

ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕШЕХОДНЫХ МАГНИТОМЕТРОВ POS

FIELD INVESTIGATIONS OF METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF POS GEOMAGNETOMETERS



Муравьев Лев Анатольевич / Muraviev L.A.

Младший научный сотрудник Института геофизики Уральского Отделения Российской академии наук / Junior research worker, Institute of Geophysics Urals Branch of RAS

e-mail: mlev@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты полевых испытаний современных высокочувствительных пешеходных геомагнитометров POS. Сопоставления в разностном режиме разных экземпляров однотипных приборов между собой. Сопоставления магнитометров POS с аналогичными по чувствительности квантовыми магнитометрами иностранного производства. Приведены примеры сопоставления вариаций геомагнитного поля, записанных приборами. Показано, что точность выявления магнитометрами POS кратковременных изменений геомагнитного поля достигает 0.05 нТл, при условии синхронизации моментов измерений геомагнитного поля.

Ключевые слова: Пешеходный высокочувствительный ядерно-прецессионный магнитометр

POS. Квантовый магнитометр. Метрологические характеристики. Вариации геомагнитного поля.

Abstract. Results of field tests of up-to-date high-sensitive pedestrian magnetometers POS are presented. Comparison in differential variant of various devices between each other. Comparison of magnetometers POS with optical pumping magnetometers of similar sensitivity class. Examples of comparison of geomagnetic field variations, recorded by high-sensitive magnetometric devices. Precision of short-term variations of geomagnetic field revelation is reaching 0.05 nT, on the assumption of measurement moments synchronization.

Keywords: Pedestrian highly sensitive nuclear-precession magnetometer POS. Quantum magnetometer. Metrological characteristics. Variations in the geomagnetic field.

Абсолютные геомагнитные измерения

Появление абсолютных магнитометров земного поля стало возможным в результате двух открытий, произошедших в начале 20-го века. Первое из них сделано в 1929 году Р. Вудом, который обнаружил расщепление спектральных линий паров натрия в магнитном поле. Объяснение этого явления, на основе аномального эффекта Зеемана выполнено И. Раби и Г. Брейтом. Второе открытие – ядерного магнитного резонанса (ЯМР), резонансных

изменений макроскопической намагниченности вещества, под действием слабого радиочастотного магнитного поля, наложенного на сильное постоянное магнитное поле [2]. Из теории этого явления, разработанной Ф. Блохом и Э. Парселлом следует наличие зависимости между частотой сигнала свободной прецессии ω протона и модулем напряженности внешнего магнитного поля B :

$$\omega = \gamma B \quad (1)$$

Здесь γ - гиромагнитное отношение протона - мировая константа, известная в настоящее время со стабильностью до 8-го знака [33]:

$$\gamma = (2,675\ 222\ 099 \pm 0,000\ 000\ 070) \cdot 10^8 \text{ рад/(нТл}\cdot\text{с)}$$

Поскольку данная величина является постоянной при изменении таких факторов как температура, давление и пр., измерения магнитного поля этим способом являются абсолютными, характеризуются точностью и стабильностью.

Первый магнитометр, построенный на этом принципе создан М. Паккардом и Р. Варианом [30] в 1947 году. Серийное производство и активное внедрение таких приборов в магнитометрическую практику началось с 1955 фирмой «Varian Associates». Позднее несколькими фирмами в мире были созданы аэромагнитометры на том же принципе. В России первые серийные пешеходные (АЯПМ-4, М-20) и аэромагнитометры (ЯП-1, АЯАМ-6) были изготовлены в 50-60-х гг (А. Я. Ротштейн, В. С. Цирель, А. П. Амосов, Ю. Н. Денисов). Точность их достигала 2 нТл, цикличность – от 7 до 1 сек [12].

Магнитометры, основанные на использовании эффекта зеемановского расщепления спектров паров щелочных элементов (квантовые) появились несколько позднее, после изобретения способа оптической накачки (А. Кастлер, Г. Демельт, У. Белл и А. Блум), благодаря чему в 60-х годах были созданы первые магниточувствительные приборы на парах гелия и рубидия с порогом чувствительности 0,02–0,06 нТл и быстродействием 2–5 изм/с (А. Кёйзер, А. Блум, Л. Ланган).

В 70-е гг. прошлого века были созданы абсолютные приборы для пешеходных магнитных измерений: квантовые (на парах цезия) магнитометры М-33 и М-60 с пороговой чувствительностью 0,1–1,0 нТл и протонный магнитометр ММП-203 с пороговой чувствительностью 1 нТл (В. П. Пак, В. П. Трипольский, Г. К. Жиров, В. С. Цирель). Данные приборы были выпущены значительными сериями и активно применялись в геологоразведочных работах вплоть до конца 20-го века.

Появление протонных и квантовых магнитометров обусловило кардинальные перемены в магнитометрии, названные В.М.Гординым [2] «революцией», а именно переход от трудоемких измерений компонент магнитного поля к

быстрым и малозатратным измерениям его модуля. За последние два десятилетия в магнитометрическом приборостроении, следуя той же терминологии, произошла еще одна «революция». Новая элементная и технологическая база позволила повысить чувствительность модульных геомагнитометров (как квантовых, так и ядерно-прецессионных) до уровня пикотеслы, и оснастить их компьютерной регистрацией результатов измерений [25].

Сравнительная характеристика современных высокочувствительных пешеходных модульных магнитометров

Среди важнейших фирм-производителей (разработчиков) высокоточной пешеходной магнитометрической аппаратуры следует перечислить зарубежные Geometrix (США), GEM Systems (Канада), Scintrex Ltd (Канада-США) [25], а также российские НИЛ Квантовой магнитометрии (Екатеринбург) и ОАО «Геологоразведка» (С-Петербург). Все указанные зарубежные фирмы изготавливают как квантовые, так и ядерно-прецессионные модели магнитометров, российские - выпускают лишь оверхаузеровские приборы.

Представленные на рынке модели имеют достаточно близкие характеристики и области применения, что делает актуальной возможность их сопоставления. Проведем их краткий обзор. Все выбранные магнитометры оснащены компьютерной регистрацией результатов измерения, а также спутниковой (GPS) технологией определения координат измеряемых точек. Каждая из моделей имеет модификацию градиентометра – возможность добавления еще одного измерительного канала - аналогичного датчика магнитного поля.

Магнитометр Geometrics G-856 – протонный, с регистрацией частоты прецессии по методу Паккарда-Вариана. Отсчетная величина 0.1 нТл, градиентоустойчивость 1000 нТл/м. Используется для низкоточной наземной магниторазведки или при низкой квалификации операторов благодаря минимальной цене и высокой стабильности рабочего вещества (керосин).

Протонные оверхаузеровские магнитометры POS (НИЛ Квантовой магнитометрии), GSM-19 (GEM Systems) и МСПГ (Геологоразведка) являются аналогами протонного с овер-

оверхаузерским усилением сигнала ЯМР. Характеризуются оптимальным соотношением цена/качество для высокоточной наземной и морской магниторазведки благодаря достаточно высокой чувствительности и градиентоустойчивости при низком энергопотреблении и весе. Рабочее вещество на основе растворов радикалов достаточно стабильно. При этом приборы имеют невысокое быстродействие, наиболее точные результаты измерений достигаются при циклах 1 измерение в 3 секунды.

Квантовые магнитометры-градиентометры GSMP-40 (GEM Systems), SM-5 (Scintrex), G-859 (858) (Geometrics) на основе оптической накачки паров щелочных металлов с регистрацией электронного эффекта Зеемана по оптическому каналу. Используются для аэромагниторазведки и сверхбыстрой съемки в археологии [9, 22], а также поиска неразорвавшихся боеприпасов [1, 34] благодаря наилучшей чувствительности (порядка 10 пкТл), быстродействию (до 10-50 измерений в секунду) и градиентоустойчивости (до 40 мкТл/м). Недостатки данных приборов – высокая цена, большое энергопотребление и вес с учетом батарей питания, а также необходимость замены датчиков при интенсивной эксплуатации. Кроме того, существует необходимость поддержания определенной ориентации датчика в пространстве. Рекордные результаты по чувствительности (отсчетная точность 0.1 пкТл) – для технологии датчика на парах калия – GSMP-40, выпускаемой GEM Systems.

Оверхаузеровский ядерно-прецессионный магнитометр POS

Использование эффекта Оверхаузера [28, 29] (динамической поляризации протонов) требует применения рабочего вещества, содержащего взаимодействующие ядерные и электронные спиновые магнитные моменты, то есть неспаренные электроны. При воздействии на такое вещество переменным электромагнитным полем определенной частоты создаются условия парамагнитного резонанса. Поглощенная электронами энергия радиочастотного магнитного поля передается ядрам (протонам) за счет чего возникает согласованная ориентировка их магнитных моментов.

Таким образом, применение эффекта Оверхаузера приводит к более интенсивной по-

ляризации рабочего вещества, и следовательно к усилению сигнала прецессии, причем достигается это меньшими затратами энергии [13].

Теоретические и экспериментальные работы по изучению и выбору рабочих веществ для датчиков с динамической поляризацией, оптимизация режимов работы магнитометров проводились в УПИ (сейчас УрФУ, г.Екатеринбург) [13] (В.Балдин, А.П. Степанов, А.И. Филатов, В.М. Стоцкий). В лаборатории квантовой магнитометрии [14, 15, 19, 20, 33], возглавляемой В.А. Сапуновым (Д.В. Савельев, А.Ю. Денисов, С.Е. Киселев) в настоящее время активно разрабатываются оверхаузеровские магнитометры различного назначения, среди которых – пешеходные магнитометры POS-1 и градиентометры POS-2 (рис. 1).

Магнитометры POS представляют собой процессорный оверхаузеровский датчик, состоящий из двух составных частей: первичный преобразователь и блок электроники, а также полевое компьютерное устройство накопления информации. Вместо данного устройства для управления датчиком может быть использован компьютер.

В первичном преобразователе происходит формирование сигнала свободной прецессии ядерной намагниченности рабочего вещества. Конструктивно преобразователь размещён в цилиндрическом корпусе и состоит из приёмно-поляризующих низкочастотных катушек, помещённого в них рабочего вещества и высокочастотного контура, необходимого для создания резонансного электромагнитного поля.

Управление и обмен информацией с датчиком осуществляется по последовательному порту COM (RS-232).

Процессорный оверхаузеровский датчик PO имеет следующие характеристики [10]: стабильность на уровне 0.02 нТл в год; порог чувствительности 0.002 нТл; частота опроса до двух измерений в секунду; работоспособность в градиентах магнитного поля до 20000 нТл/м.

Для натурального сопоставления с прибором POS нами выбраны магнитометры Geometrics g858 и Scintrex SM-5 NAVMAG. Сравнительные характеристики [21, 32] этих приборов приведены в табл. 1.



Рис. 1. Общий вид пешеходного магнитометра-градиентометра POS-2

Таким образом, разработанные в России пешеходные высокочувствительные ядерно-прецессионные магнитометры POS обладают характеристиками на уровне моделей ведущих мировых производителей аналогичного оборудования. Их отличительными особенностями является процессорная обработка сигнала прецессии [19] и возможность оценки качества единичного измерения сразу после его осуществления [33]. Такие характеристики, как компьютерная регистрация результатов измерения, топопривязка точек наблюдения с помощью GPS, наличие часов реального времени, возможность осуществления непрерывного режима измерений – являются общими для всех современных пешеходных магнитометров.

Общее достоинство всех типов ядерно-прецессионных магнитометров перед магнитометрами с оптической накачкой (квантовыми) – абсолютное измерение величины магнитного

поля, обусловленное физикой процесса, не подверженное влиянию температурного фактора. Это делает возможным их использование не только в магниторазведочных работах но и в обсерваторской практике [27] для долговременных мониторинговых наблюдений.

Кроме того, магнитометр POS оснащен удобным интерфейсом пользователя, прост в использовании, имеет небольшой вес и габариты.

Для введения данного типа магнитометрической аппаратуры в практику геофизических исследований необходимо определить ее возможности для решения практических геолого-геофизических задач на фоне помех как естественного так и искусственного происхождения и сопоставить в натурных экспериментах в реальных геологических условиях с аналогичной аппаратурой.

Некоторые характеристики магнитометров POS, Geometrics g858m и Scintrex SM-5 NAVMAG

Характеристика	POS	Geometrics g858	Scintrex SM-5 NAVMAG
Тип технологии датчика	Оверхаузеровский протонный	Оптическая накачка паров цезия	Оптическая накачка паров цезия
Диапазон измерения поля	20000 – 100000 нТл	18000 – 95000 нТл	18000 – 95000 нТл
Предел чувствительности	0.01 нТл при времени изм. 3 сек	0.008 нТл при изм. 1 сек	0.006 нТл при изм. 0.1 сек
Точность	0.2-0.5 нТл	1.5 + 0,05°C	2,5 датчик ±0,2
Требования к ориентировке датчика	Работоспособен при любой ориентировке, при неоптимальной ориентировке доп. погр. до 1 нТл	Сохраняет работоспособность при 45° ±35° к напр. земного поля	10°-85° к направлению земного поля
Потребляемый ток, мощность	300-400 мА, 4 Вт	600 мА, 10 Вт старт, 7 Вт при 20°C	15 Вт старт
Рабочая температура	от -30°C до 50°C	от -15°C до 50°C	от -30°C до 50°C
Термостабилизация	нет необходимости	непрерывный подогрев датчиков	непрерывный подогрев датчиков, темп. дрейф 0.01 нТл/°
Время работы от одного комплекта аккумуляторов	несколько дней	3-6 часов	2 часа, при использовании доп. батареи – 4 часа.
Полный вес комплекта	6 кг	6 кг	10 кг + доп. батарея 5 кг
Периодичность измерений в непрерывном режиме	1 раз в 3 сек, некоторые модели допускают режим 1 изм. в 0.5 сек	до 1 раз в 0.1 сек	до 1 раз в 0.1 сек
Градиентоустойчивость	20000 нТл на метр, 40000 форсаж	20000 нТл на метр	40000 нТл на метр
Время «жизни» датчика	10 лет	≥3000 часов ресурс	≥5000 часов ресурс

Магнитометрические измерения в реальных условиях

Осуществление измерений высокочувствительным прибором в реальных геолого-геофизических условиях, при воздействии вариаций геомагнитного поля, а также различного рода помех является сложной задачей.

Вариации Земного магнитного поля – непрерывные псевдослучайные его изменения [18], обусловленных как явлениями в ионосфере, так и процессами, проходящими на поверхности, и в земной коре [26]. На медленно меняющееся так называемое главное геомагнитное поле [23] накладывается переменное магнитное поле (суточные вариации, короткопериодные колебания, магнитные бури), вызванные внешними процессами, происходящими в ионосфере. Интенсивность невозмущенных суточных вариаций меняется в пределах Земли, возрастает от экватора к полюсам, достигая 200 нТл [17].

Существуют возмущенные вариации, к которым относятся непериодические импульсные вариации и магнитные бури. Они

зависят от возмущений в ионосфере, которые, в свою очередь, связаны с приходом на Землю корпускулярных потоков от вспышек на Солнце [17, 18]. Усредненный спектр геомагнитных возмущений приведен в [18].

Изучить метрологические характеристики прибора в таких условиях можно путем проведения разностных измерений, то есть разместить датчики магнитометров в однородном магнитном поле в нескольких метрах друг от друга и вести длительную запись вариаций геомагнитного поля от нескольких часов до суток. Применение подобного метода описано в работе [8] для приборов другого класса точности. Поскольку изучаемый нами параметр – разностный сигнал выделяется на фоне шумов, среднее квадратичное отклонение разности показаний магнитометров будет зависеть от временного сдвига моментов включения приборов и спектральной плотности возмущений геомагнитного поля.

Схема образования этого шума, добавляющегося к разностному сигналу, показана на рис. 2.

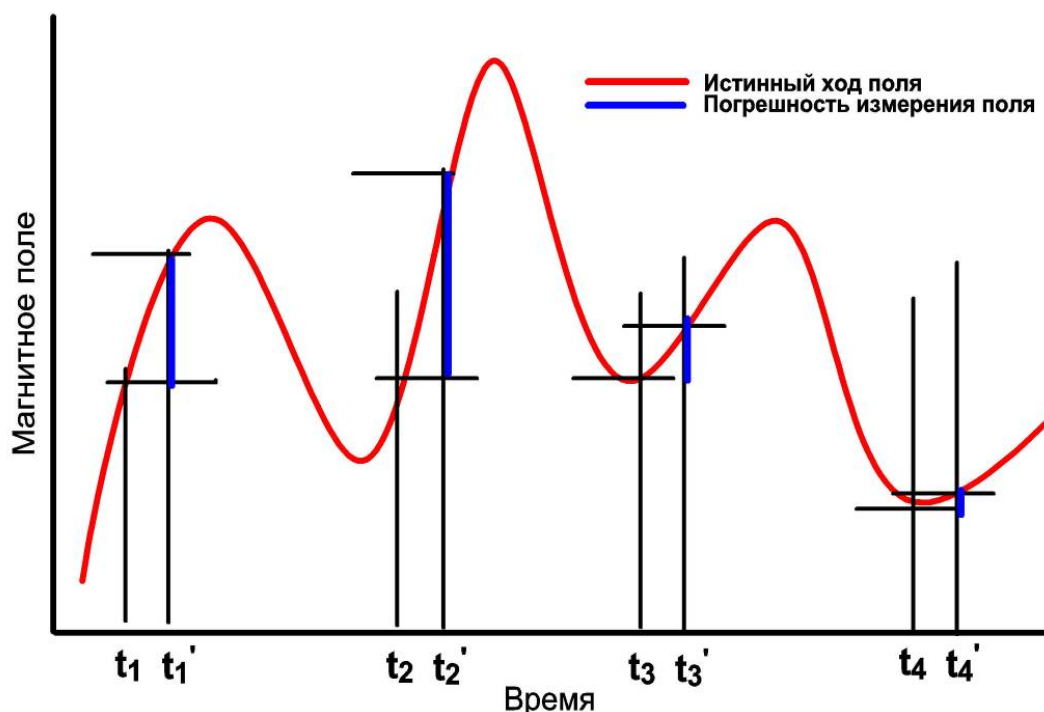


Рис. 2. Причины появления погрешности при разностных измерениях

Амплитуда шума зависит от величины временного сдвига моментов включения приборов и спектральной плотности возмущений геомагнитного поля. Выполненные ранее тео-

ретические и экспериментальные исследования [4] показали, что для того чтобы достигнуть погрешности на уровне единиц пикотеслы синхронность моментов измерений долж-

на отличаться на миллисекунды (при времени счета прибором 1 секунда).

В магнитометрах POS [10] используются внутренние алгоритмы обработки и усреднения сигнала за время получения единичного отсчета [19, 20, 33]. Поэтому целью настоящего исследования являлось натурная оценка требований к синхронизации.

Полевые исследования выполнены в магнитоспокойные дни в различное время суток, на территории геофизической обсерватории Арти (Свердловская область). Данное ме-

сто удалено от промышленных магнитных помех. На рис. 3 приведен пример разностей показаний двух аппаратурно синхронизованных магнитометров (кварцевые часы), а также третьего прибора синхронизованного с первыми вручную (интервал между пусками которых составлял порядка секунды). В первом случае средне-квадратичное отклонение шумового сигнала составило 0,03 нТл, а во втором порядок выше - 0,3 нТл. Приведен также график геомагнитного поля.

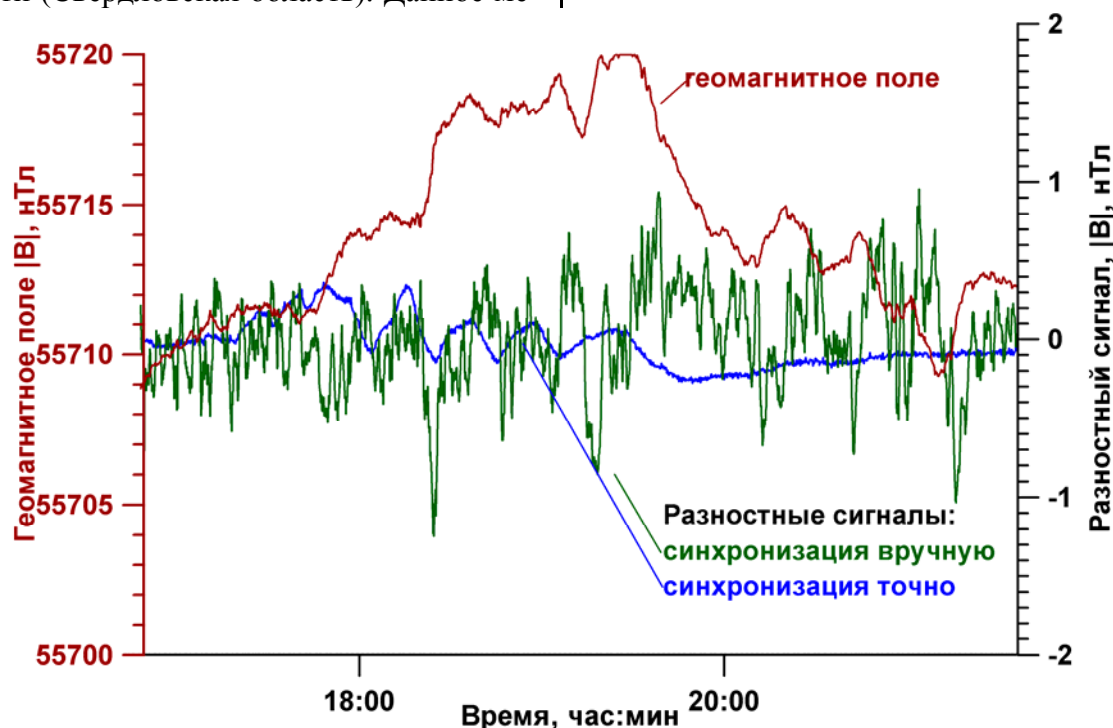


Рис. 3. Влияние точности синхронизации моментов включения магнитометров на возможность выявления слабых изменений магнитного поля

Таким образом, для обеспечения точности учета вариации на уровне чувствительности прибора, особенно при долговременных режимных наблюдениях, необходима как можно более точная синхронизация моментов измерений магнитометрической аппаратуры.

В качестве иллюстрации экспериментов по одновременному наблюдению динамики геомагнитного поля в реальных геолого-геофизических условиях, приведем следующие примеры. Эксперименты проведены на севере о.Сахалин в магнитоспокойные дни в удаленном от промышленных помех месте. Два датчика градиентометра POS-2 были жестко установлены на высоте 1 м над поверхностью земли, один из датчиков находился

вблизи небольшого ручья. Расстояние между датчиками составило 5 м. Разность значений магнитного поля между датчиками составляла примерно 5 нТл. На рис. 4 приведена запись вариации магнитного поля и разности измеренных датчиками значений. На рис. 5 показан результат аналогичного эксперимента, но при этом разность значений поля между датчиками не превышала 1 нТл. Эксперимент был проведен в ночное время, а наибольшая динамика градиента магнитного поля отмечена утром, что может быть объяснено изменением температуры, а следовательно и температурного градиента в пределах датчика [33]. Еще одна возможная причина - активизация перетоков флюида в почве [6, 11].

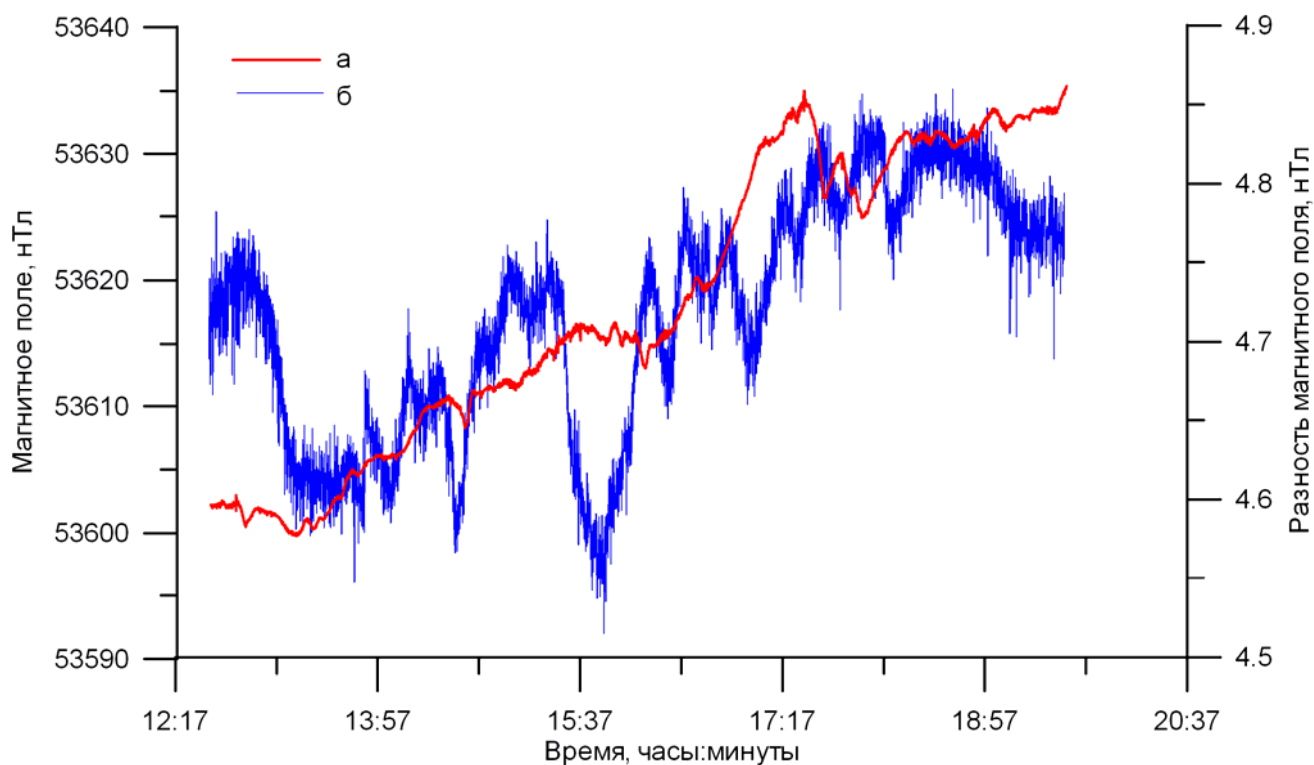


Рис. 4. Запись градиентометром POS-2 вариации геомагнитного поля в реальных геолого-геофизических условиях: разность магнитного поля между датчиками составляет около 5 нТл. а - значение магнитного поля, регистрируемое одним из датчиков (левая ось ординат), б - разность между показаниями датчиков (правая ось ординат)

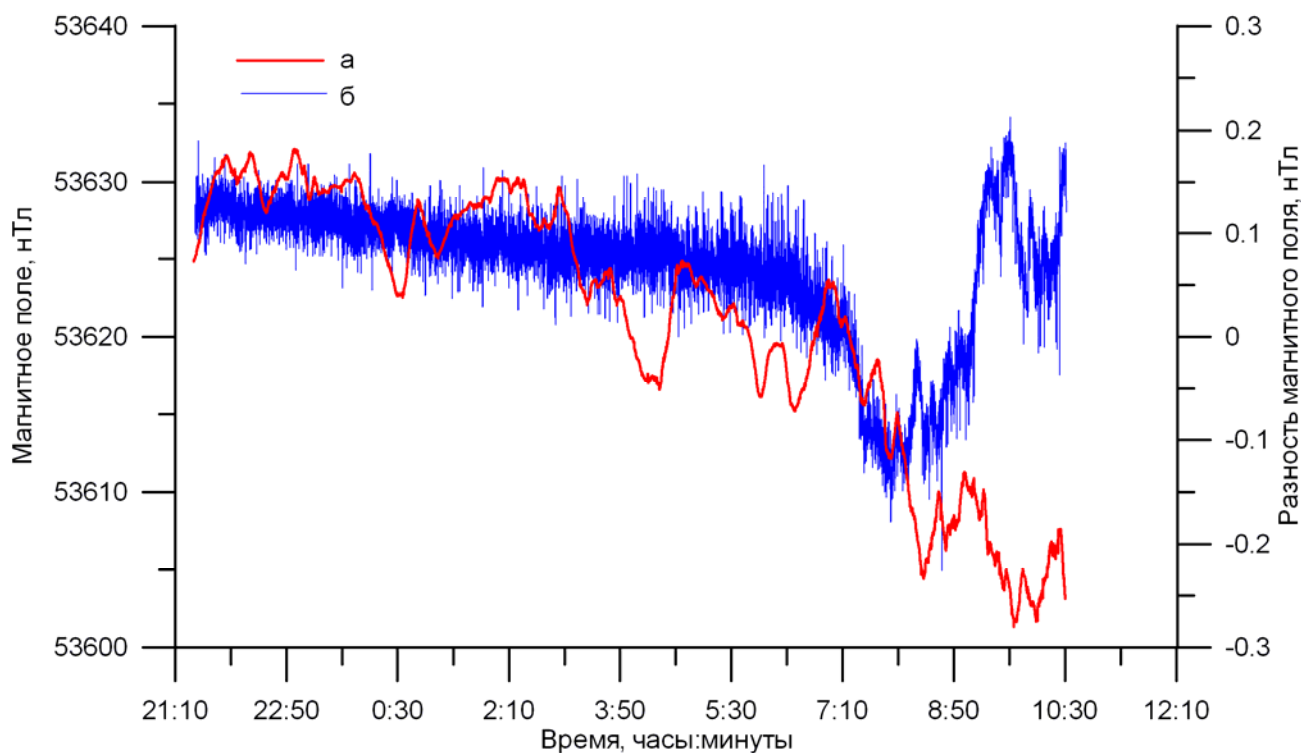


Рис. 5. Запись градиентометром POS-2 вариации геомагнитного поля в реальных геолого-геофизических условиях: разность магнитного поля между датчиками составляет менее 0.2 нТл, а - значение магнитного поля, регистрируемое одним из датчиков (левая ось ординат), б - разность между показаниями датчиков (правая ось ординат)

Натурное сравнение магнитометров POS и Geometrics G858

Для сравнения выбран современный высокочувствительный квантовый цезиевый магнитометр g858g производства Geometrics, США. Данный прибор, благодаря большому количеству измерений в секунду, применяется для пешеходных магнитных съемок, в частности, при поиске неразорвавшихся боеприпасов и для археологических исследований [22]. Эксперимент был выполнен совместно с сотрудниками отделения геофизики геологического факультета МГУ.

В нашем распоряжении имелся один магнитометр Geometrics g858m в варианте градиентометра и два идентичных комплекта магнитометров POS. Место проведения эксперимента – учебно-научная база отделения геофизики геологического факультета МГУ в

д.Александровка – удалено от промышленных помех.

Всего было проведено две серии синхронных наблюдений магнитного поля. Часы двух магнитометров POS перед каждым экспериментом были точно синхронизованы между собой с помощью соответствующей встроенной функции. Часы магнитометра Geometrics в начале испытаний синхронизованы с часами POS с помощью GPS с точностью до секунды. Эксперименты проводились в зимнее время, поэтому для исключения повреждения аппаратуры велся мониторинг температуры воздуха.

В первом эксперименте точки установки датчиков выбраны в магнитном поле с однородностью 5 нТл/м, на расстоянии около 5 м друг от друга. Высота установки датчиков 1,5 м. Периодичность измерения - 3 секунды. Графики магнитного поля и разности показаний трех приборов показаны на рис. 6.

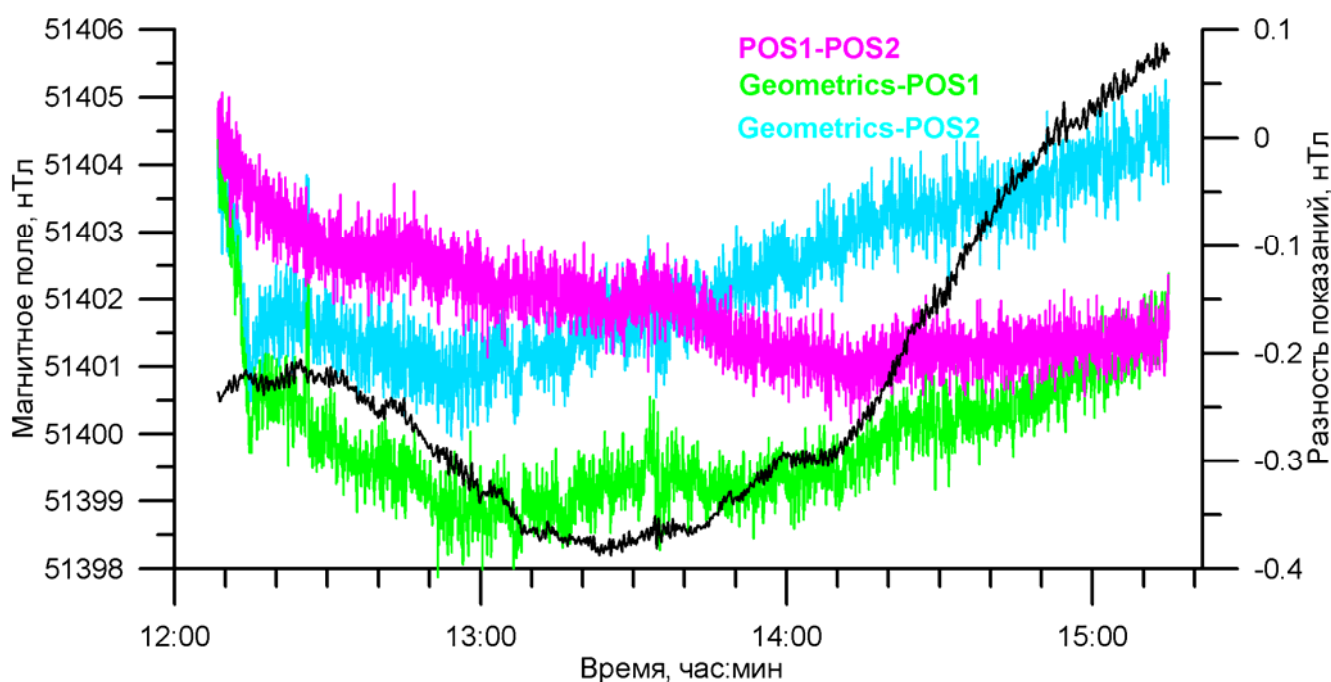


Рис. 6. Вариация магнитного поля (левая ось, черная кривая) и разности показаний трех приборов (правая ось, цветные кривые), первый эксперимент

Из графика видно, что при условии точной синхронизации и одинаковой периодичности измерений разностные сигналы практически не отличаются друг от друга. В начале измерения на графиках разности показаний между каждым прибором POS и Geometrics виден существенный «дрейф» поля, длительностью около 10 – 15 минут, связанный с про-

гревом датчика Geometrics. Ширина «шумовой» разностной полоски в течение эксперимента постоянна и составляет во всех случаях около 0,05 нТл.

Во втором эксперименте датчики установлены в поле с однородностью до 1-2 нТл/м, но на расстоянии 20 – 40 м друг от друга. Периодичность измерения датчиком

POS - 3 сек, Geometrics – 1 сек. Соответствующий график вариации магнитного поля и разности показаний приведен на рис. 7.

Увеличение ширины шумового сигнала – разности показаний между POS и Geometrics связано, по-видимому, с уменьшением точности Geometrics при односекундном цикле измерений а также с расхождением часов приборов, т.к. повторная синхронизация времени не производилась.

Наблюдаемое по графику изменение режима измерений в середине эксперимента скорее всего обусловлено падением температуры от -3 до -9 °С. Поскольку уменьшение температуры началось резко, сразу после за-

хода солнца, на Geometrics это отразилось скачком измеренного значения поля до 0,5 нТл. По всей видимости, это изменение режима автоматической термостабилизации датчика. На кривой разности между двумя магнитометрами POS наблюдается плавное падение поля на одном из датчиков, возможно, также вызванное температурными эффектами.

Выявленные особенности поведения датчиков Geometrics и POS при изменениях температуры необходимо учитывать при планировании и проведении экспериментов по долговременным мониторинговым наблюдениям геомагнитного поля [7].

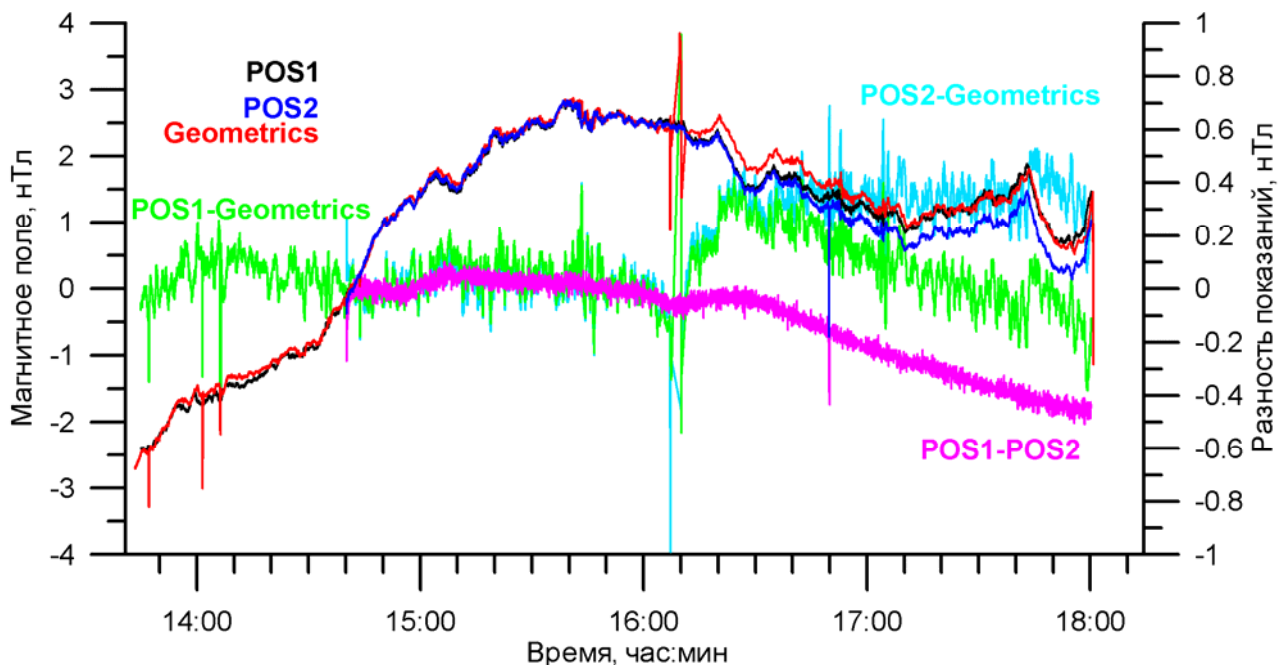


Рис. 7. Вариация магнитного поля для трех приборов, приведенная к общему уровню (левая ось) и разность показаний трех приборов (правая ось), второй эксперимент.

Натурное сравнение магнитометров POS и Scintrex SM-5

Градиентометр Scintrex SM-5 является еще одним современным магнитометрическим прибором, активно применяемым за рубежом. Этот квантовый (на парах цезия) магнитометр производится в Канаде.

Экспериментальное сравнение данного магнитометра с приборами POS проведено на территории геофизической обсерватории Арти, Свердловская область. Было задействовано 7 датчиков пяти магнитометров, в скобках указаны их обозначения на графиках да-

лее: градиентометр POS (2 датчика: grad1, grad2), градиентометр Scintrex SM-5 (2 датчика: Scintrex1, Scintrex2), два пешеходных магнитометра POS: заводской № 91, 2007 года изготовления (POS91), и заводской № 100, 2004 года, (POS100). Также для сравнения использованы данные со стационарно установленного в обсерватории датчика аналогичного магнитометра POS (ARTI).

Датчики градиентометра POS-2 установлены на крыше одного из немагнитных павильонов на жесткой штанге на расстоянии 1 м друг от друга и в 1 м от крыши. Датчики градиентометра Scintrex установлены внутри

того же павильона на жесткой штанге на расстоянии 1 м друг от друга, верхний датчик находился примерно в 1 м от крыши (2 метра от нижнего датчика градиентометра). Датчики

магнитометров POS-1 № 91 и № 100 установлены каждый в своем немагнитном термостабилизированном павильоне. Схема эксперимента показана на рис. 8.

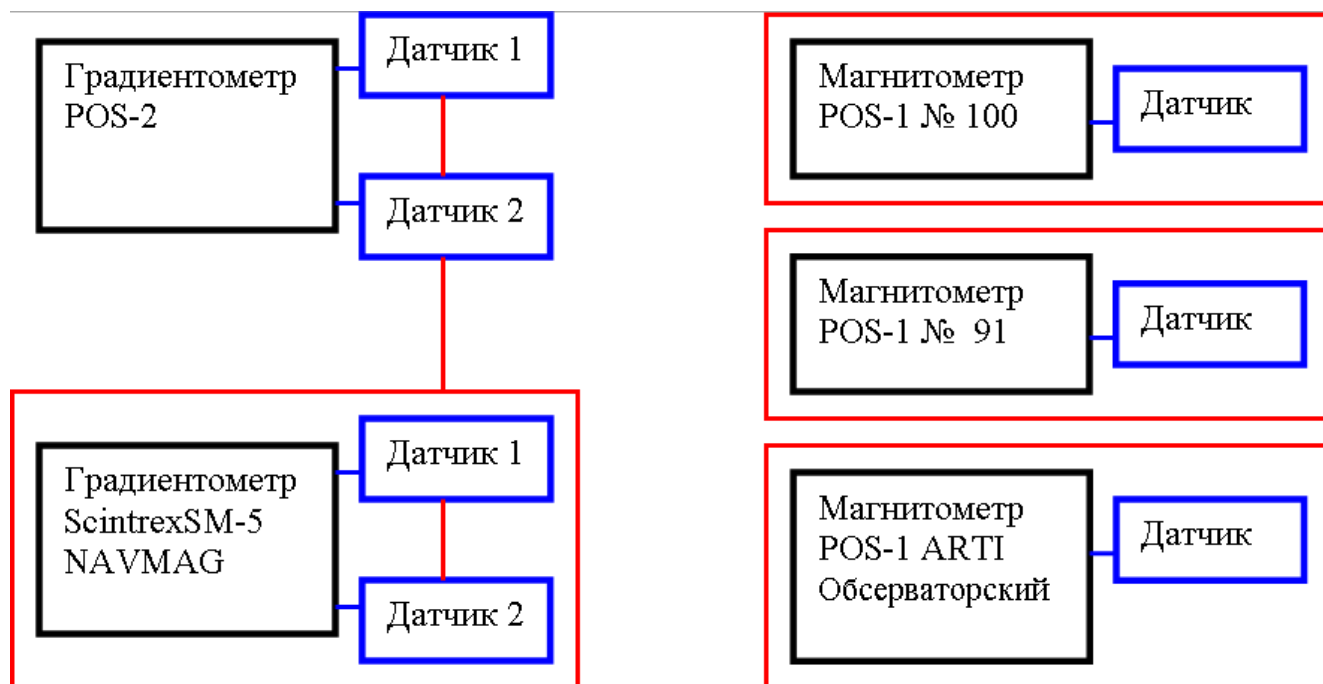


Рис. 8. Схема осуществления эксперимента: каждый магнитометр находится в отдельном магнитометрическом павильоне обсерватории (красный контур). Датчики градиентометра POS-2 закреплены на крыше павильона, в котором установлен градиентометр Scintrex SM-5

Часы всех участвующих в эксперименте магнитометров были синхронизованы с максимально достижимой для данных приборов точностью.

Все магнитометры POS проводили измерения 1 раз в 3 секунды. Периодичность записи градиентометром Scintrex - раз в секунду. Для возможности сравнения измерения Scintrex разбиты на три серии: "первая секунда из трех", "вторая из трех" и "третья из трех".

На записях хорошо выявляется искажение магнитного поля в момент поляризации датчика в приборах POS. Датчики градиентометров POS и Scintrex были расположены достаточно близко друг к другу, процесс поляризации длится чуть больше 1 секунды, и искажение магнитного поля отчетливо видно на записях серий "первая секунда из трех", "вторая секунда из трех". Зарегистрированный между 2 и 3 часами скачок градиента магнитного поля соответствует времени отключения градиентометра POS. На записи

"третья секунда из трех" скачка не видно вовсе. Поэтому во всех дальнейших сравнениях участвует именно эта запись. Соответствующие графики разностей между показаниями магнитометров-градиентометров показаны на рис. 9.

Сопоставления разностей между показаниями датчиков одного прибора (т.е. градиента для двух градиентометров, Scintrex и POS) выявляют разный характер регистрации поля. Ширина "шумовой полоски" Scintrex существенно меньше (0.05 нТл) чем для POS (до 0.15 нТл). В записи Scintrex практически отсутствуют выбросы свыше 0.1 нТл от среднего значения, а в записи POS такие выбросы есть.

Записи разности между датчиками Scintrex отчетливо выявляют дрейф в первые часы эксперимента, который, по всей видимости, является температурным. Датчики квантовых магнитометров Scintrex являются термостабилизированными, и колебания внешней температуры, вызывают небольшие колебания температуры внутри датчика и таким

образом, дрейф измеренного значения поля. В инструкции к магнитометру Scintrex, так же как и Geometrics указано на необходимость прогрева в течение 20 мин перед измерениями. А в эксперименте прибор был занесен с улицы (температура около 0°C) в теплый па-

вильон. Процесс установления постоянной температуры датчика прибора мог длиться несколько часов. Плавное уменьшение разницы между показаниями датчиков начиная с 3 часов ночи часов может быть объяснено повышением температуры от ночной к утру.

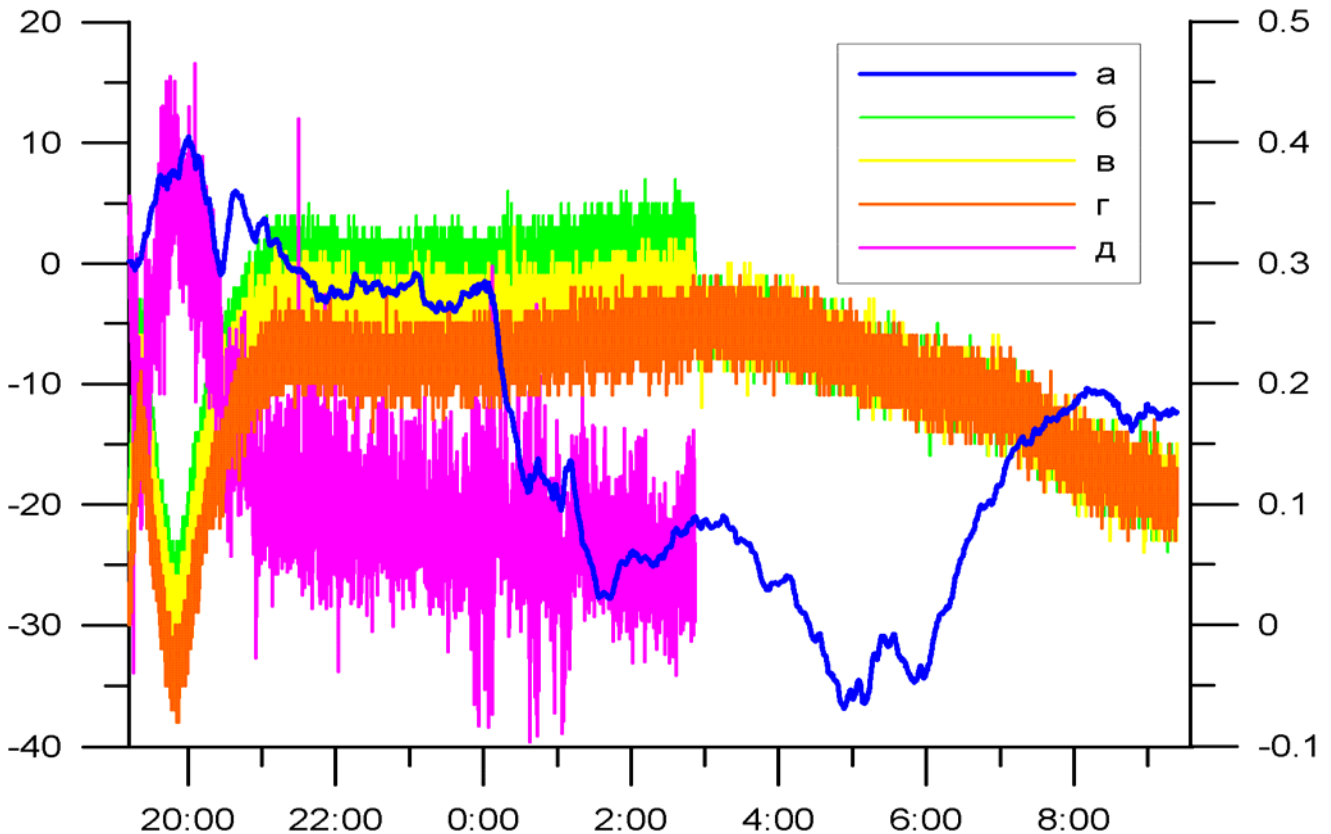


Рис. 9. Магнитное поле (левая ось) и разность между показаниями двух датчиков градиентометров (правая ось): а – геомагнитное поле б – разность между датчиками Scintrex, первая секунда из трех; в – то же, вторая секунда из трех; г - то же, третья секунда из трех; д – разность между показаниями одного из датчиков Scintrex и градиентометра POS

Рассмотрение разностей между вторым датчиком Scintrex и остальными приборами позволяет определить, что описанному выше дрейфу был подвержен именно первый датчик. Разности показаний между датчиками магнитометров показаны на рис. 10.

Наиболее стабильным в данном эксперименте оказался магнитометр POS № 91. На рис. 11 приведены разности измерений между магнитометром № 91 и датчиками других магнитометров. Для сравнения выбраны приборы, показавшие наименьший дрейф: градиентометр POS, датчик 2 градиентометра Scintrex и обсерваторский магнитометр POS

ARTI. Наименьшая ширина шумового разностного сигнала составила 0.05 нТл.

В эксперименте по одновременному наблюдению вариации геомагнитного поля магнитометрами различных типов удалось уверенно разделить влияние тех или иных факторов на каждый из датчиков, в зависимости от типов магнитометров. В проводимых нами ранее экспериментах выявлялись аналогичные явления, но невозможно было установить, вблизи какого из датчиков находится источник изменения магнитного поля, или какой из датчиков, в силу аппаратных особенностей, больше подвержен дрейфу измеренного значения.

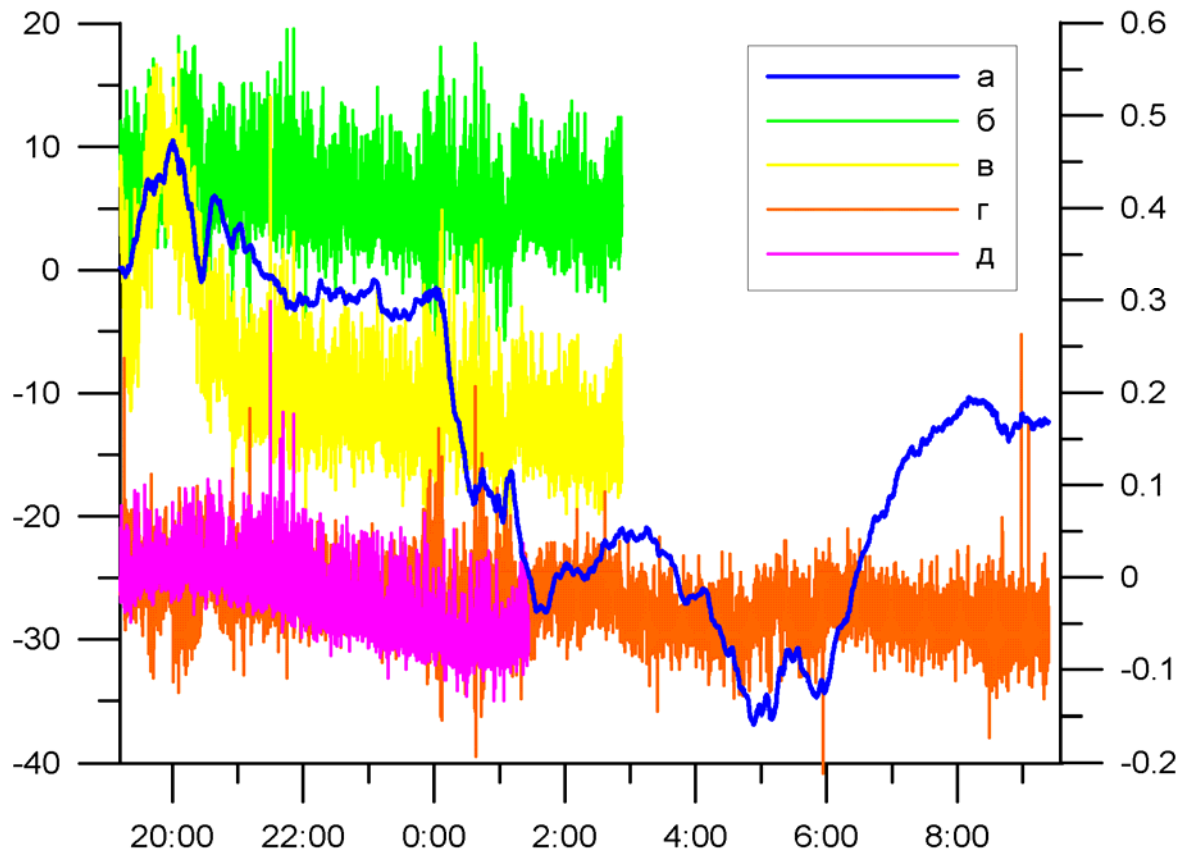


Рис. 10. Магнитное поле (левая ось) и разность между показаниями двух датчиков магнитометров и градиентометров (правая ось): а – геомагнитное поле; б - Scintrex датчик 2 и POS датчик 1; в - Scintrex датчик 1 и POS датчик 1; г - Scintrex датчик 2 и обсерваторский магнитометр POS (ARTI); д - магнитометр POS №91 и POS датчик 1

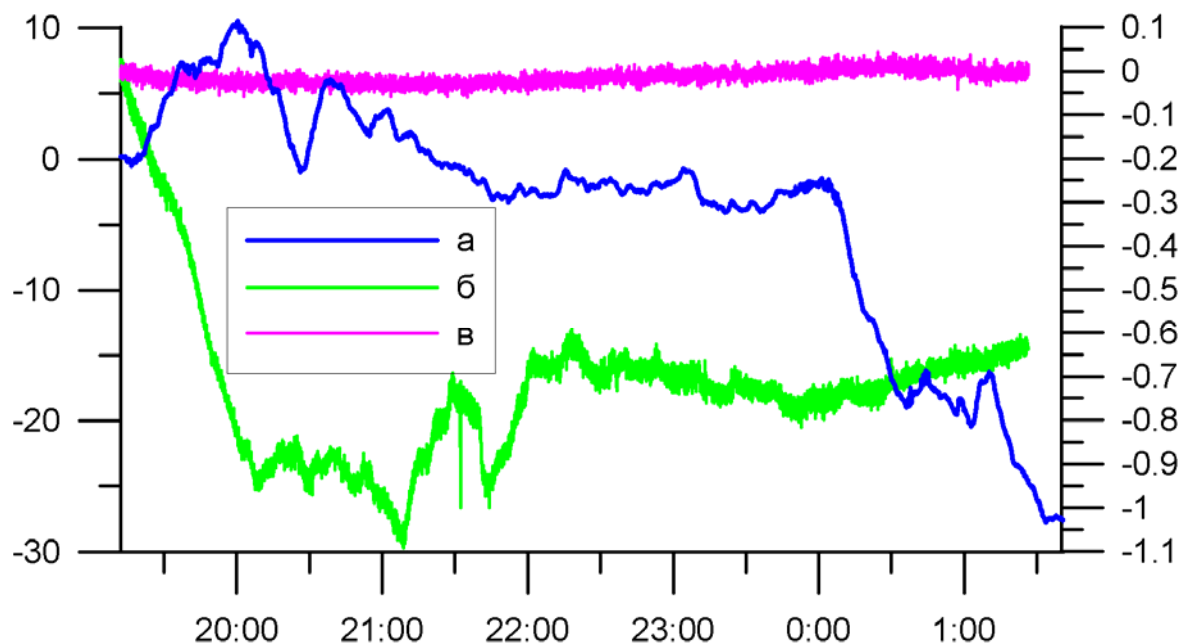


Рис. 11. Магнитное поле (левая ось) и разность между показаниями магнитометров, между которыми зарегистрирован наибольший и наименьший «дрейф» разности показаний (правая ось): а - магнитометры POS №100 и №91; б - магнитометр POS №91 и обсерваторский магнитометр POS (ARTI)

Получено подтверждение влияния процесса поляризации в датчике оверхаузеровского магнитометра POS на измерения вблизи него. Регистрируемый эффект имеется на расстояниях до нескольких метров от датчика, что выдвигает особые требования к расположению магнитометров в экспериментах по выявлению слабых тектономагнитных сигналов, а также требования к стабильности часов приборов. Изначально синхронизованные часы магнитометров могут со временем разойтись и моменты измерения будут не совпадать. В таком случае в регистрируемый сигнал будет добавляться и определенный вклад от поляризации соседнего датчика, поскольку процессор датчика POS определяет поле как среднее по времени спада релаксационного сигнала [33].

Выявлен значительный температурный дрейф квантового магнитометра Scintrex. Обнаружены различия в характеристиках, дрейф, выбросы значений поля, между различными экземплярами приборов POS. Более стабильной оказалась пара более новых приборов.

Наименьшая величина разностного сигнала составляет 0.05 нТл что не отличается от определенного ранее значения [7]. Повидимому, это предел выявления современными высокочувствительными магнитометрами особенностей изменения магнитного поля в реальных геолого-геофизических условиях, достижимый с применением специальных методических решений.

Перед проведением высокоточных измерений геомагнитного поля (мониторинговых наблюдений вариаций, прецезионных магнитных съемок) следует проводить подобные сопоставления магнитометрической аппаратуры. Определение наименее подверженных температурному дрейфу экземпляров приборов и получение оценок наибольшей величины дрейфа позволит определить погрешность выявления разностных сигналов в этих экспериментах. Данная рекомендация введена в практику работы с магнитометрами в ГРО «Катока» [16].

Пространственное распределение суточных вариаций геомагнитного поля на примере пунктов у пос. Арти и г.Тобольск

Наличие высокочувствительной магнитометрической аппаратуры позволяет вернуться к некоторым актуальным вопросам магнитометрии, таким как изучение особенностей пространственного распределения вариаций геомагнитного поля и аномалий векового хода.

В настоящее время результатом исследований пространственного распределения поля магнитных вариаций стало закрепленное в инструкции по магниторазведке [5] утверждение о практической идентичности магнитных вариаций в точках, расположенных на расстояниях ближе, чем 50 км друг от друга. Это правило не применимо к полярным и прибрежным районам, где существует аномальный ход геомагнитных вариаций.

Во время проведения магниторазведочных работ вблизи г.Тобольск Тюменской области осуществлена непрерывная запись вариации геомагнитного поля в течение 30 дней. Полученные вариограммы сопоставлены с записями магнитных вариаций ближайшей к месту съемки обсерватории Арти, осуществленными аналогичным прибором POS, установленным стационарно. Расстояние по прямой между двумя пунктами, где велась запись геомагнитного поля, составило 570 км. Периодичность измерений обоими магнитометрами составляла в разные дни от 3 до 6 секунд. На рис. 12 приводятся примеры сопоставления. Расхождение между значениями магнитного поля в разные дни составляет от нескольких единиц до десяти нТл.

Еще один эксперимент проведен на о.Парамушир (Курильские острова) при содействии МП «Электра» (г.Южно-Сахалинск). Датчики трех магнитометров были расположены в виде треугольника со сторонами от 1 до 2 км в области парогидротермальной и вулканической активности (Высокоутесный участок), на расстоянии около 5 км до берега Тихого океана. Выполнена синхронная запись вариации геомагнитного поля в течение 5 часов. Графики разностей показаний каждой пары датчиков и геомагнитного поля, записанного каждым из магнитометров, приведены на рис.13. Записи поля и разностей приведены в одном масштабе, и видно, что изменение разности показаний за время наблюдения является значительным, до 10-12

нТл, что может быть объяснено не только прибрежной зоной, но и отражением в магнитном поле процессов, происходящих в зем-

ной коре по причине геотермальной и вулканической активности.

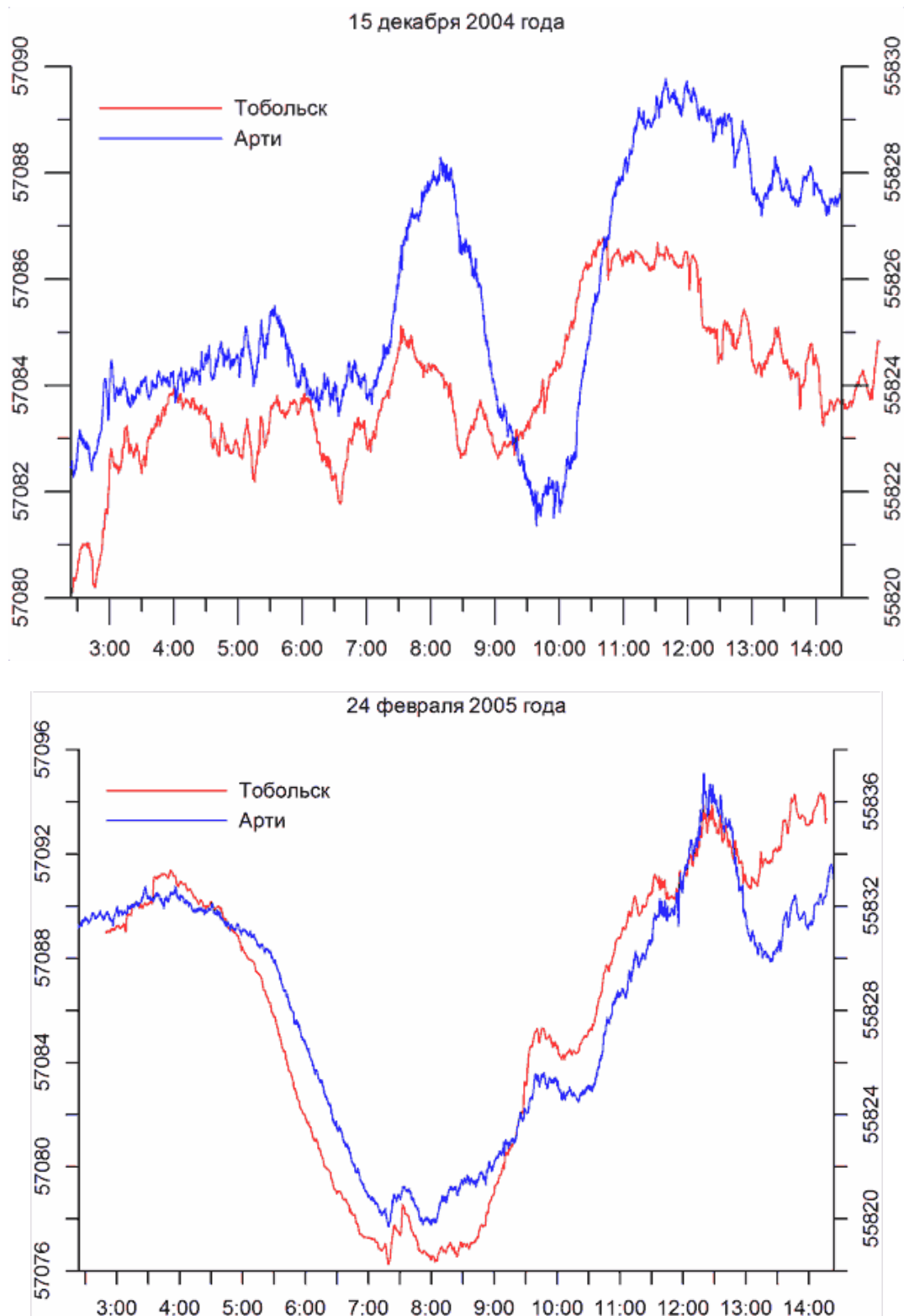


Рис. 12. Примеры сопоставления записей вариации геомагнитного поля в обсерватории Арти и около г.Тобольск. Синяя кривая - данные обсерватории Арти, красная - пункта Тобольск. Ось значений магнитного поля (вертикальная) левая соответствует кривой Тобольск, правая – данным Арти. Единицы измерения

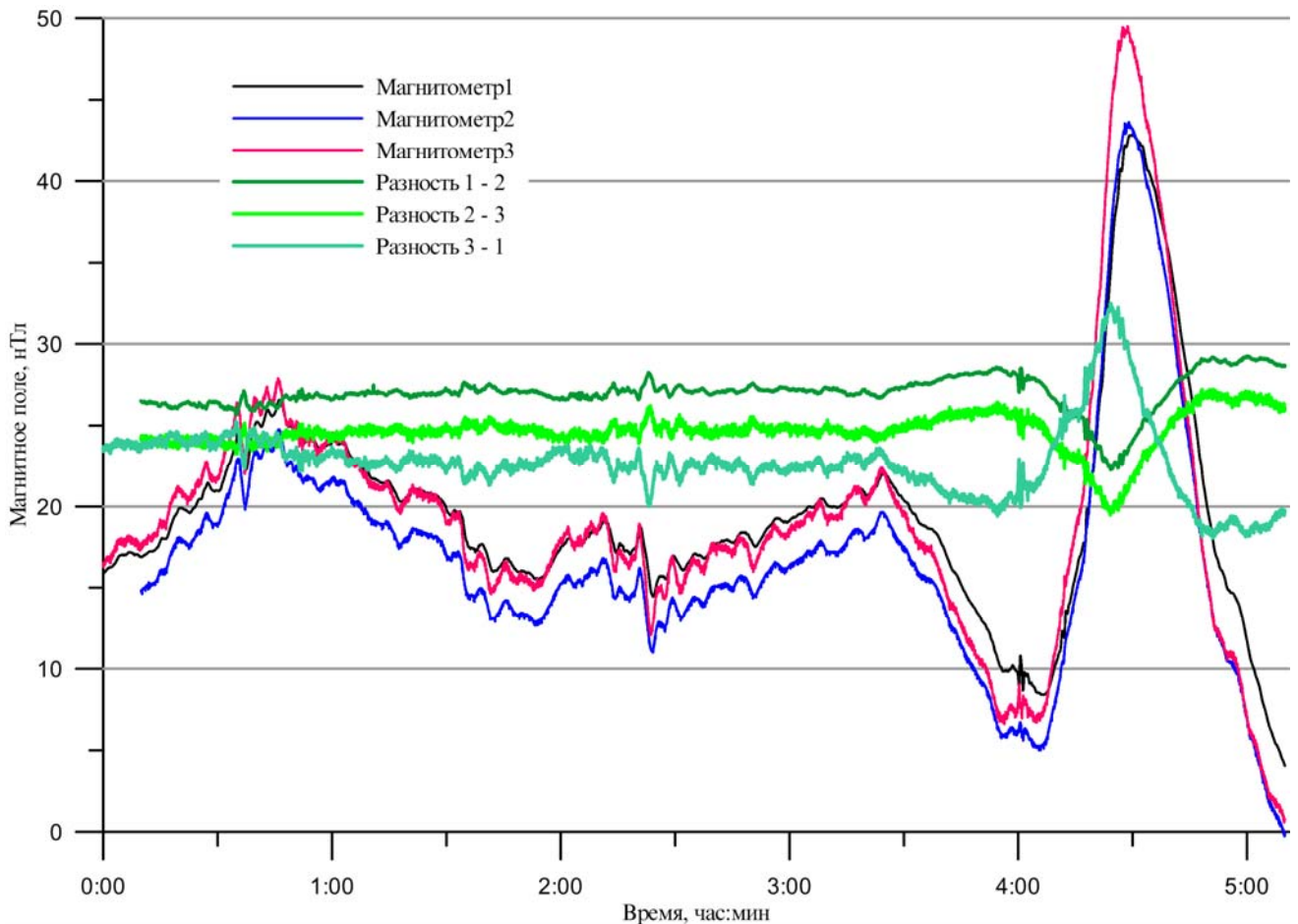


Рис. 13. Записи магнитного поля и попарные разности показаний трех датчиков магнитометров, установленных «треугольником» на расстоянии 1-2 км друг от друга в районе парогидротермальной активности, о.Парамушир.

Выводы

Повышение чувствительности магнитометров позволяет выявлять не принимавшиеся во внимание ранее эффекты, вызывающие изменение магнитного поля амплитудой до единицы нанотеслы. Их необходимо учитывать при осуществлении высокоточных магнитных измерений.

Результаты экспериментов по одновременному наблюдению вариаций геомагнитного поля несколькими магнитометрами позволяют сделать выводы:

- предел выявления указанными типами магнитометров особенностей изменения магнитного поля составляет не менее 0,05 нТл, это минимальная зарегистрированная «ширина» разностного сигнала;
- природа этого разностного сигнала может быть связана как с процессами, возни-

кающие в приборах, так и с отражением в магнитном поле реальных, но не контролируемых физических явлений, проходящих вблизи датчика. Эти явления сами могут быть объектами исследований;

- указанная точность достижима только с применением точной (1 мс) синхронизации моментов измерения магнитного поля и с исключением влияния на процесс измерения внешних факторов (температура и т.п.).

Магнитометры POS могут быть применены в экспериментах по получению отклика в магнитном поле при искусственном или естественном воздействии на геолого-геофизическую неоднородность среды (например, разлом, рудное тело, скважина). При этом следует учитывать приборный дрейф магнитометра а так же приповерхностные «микромагнитные» явления. Если предпола-

гается изучать кратковременные изменения магнитного поля, то точность их выявления может достигать 0.05 нТл, при условии учета этих явлений. При долговременных наблюдениях (месяцы, годы) технология эксперимента должна учитывать возможность дрейфа отдельных экземпляров приборов амплитудой до 1 нТл. При экспериментах по выявлению разностных магнитных сигналов на расстояниях в сотни километров следует учитывать неоднородность вариации геомагнитного поля.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю к.ф.-м.н. Ю.К.Доломанскому, а также заведующему лабораторией квантовой магнитометрии УрФУ к.ф.-м.н. В.А.Сапунову за ценные консультации.

Литература

1. Булычев А.А., Горбунов А.А., Золотая Л.А., Лыгин И.В., Модин И.Н., Паленов А.Ю., Муравьев Л.А. Геофизическая разведка неразработанных боеприпасов. // Тезисы докладов второй международной научно-практической конференции «Инженерная геофизика» Гелленжик, 2006. С-Пб., 2006. С.53-55.
2. Гордин В.М. Очерки по истории геомагнитных измерений. М.:ИФЗ РАН, 2004. 162 с.
3. Доломанский Ю.К., Муравьев Л.А. Геомагнитный павильон обсерватории Арти. // 170 лет обсерваторских наблюдений на Урале: история и современное состояние. Материалы международного семинара. Екатеринбург, 2006. с. 70-71
4. Доломанский Ю.К. Зорин С.Э., Номерованный О.М. Требования к синхронности измерений квантовыми магнитометрами при регистрации разностных эффектов. // 4 Всесоюзный съезд по геомагнетизму. Тезисы докладов.ч.1. Владимир-Суздаль, 1991. с.176-177
5. Инструкция по магниторазведке. Наземная магнитная съемка. Аэромагнитная съемка. Гидромагнитная съемка. Л.: Недра. 1981. 264 с.
6. Караев А. П. Основы геоэлектрики. Л.: Недра, 1965. 587 с.
7. Муравьев Л.А. Сравнение метрологических характеристик пешеходных магнитометров POS и Geometrics // Современные проблемы геофизики. Седьмая Уральская молодежная школа по геофизике. Сборник материалов. Екатеринбург: УрО РАН. 2006. 94-98 с
8. Номерованный О.М., Пьянков В.А. Определение случайной погрешности магнитометров по методу «трех свидетелей». В кн.: теория и аппаратура для геомагнитных исследований. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983. с 67-70\
9. Носкевич В.В., Федорова Н.В. Муравьев Л.А. Использование магнитометрии при изучении археологических памятников эпохи бронзы на Южном Урале. Геофизика №4, 2010 г СС. 69-75
10. Процессорный оверхаузеровский датчик POS-1 (ПОС-1) Руководство по эксплуатации. Лаб. КМ УГТУ. Екатеринбург, 2000. 41 с.
11. Ревякин П.С. Бродовой В.В. Ревякин Э.А. Высокоточная магниторазведка. М.: Недра. 1986. 272 с.
12. Ротштейн А.Я., Цирель В.С. Протонные магнитометры геомагнитометры. Основы устройства и область применения. М.: Госгеолотехиздат, 1963. 48 с.
13. Рыжков В.М., Степанов А.П. О возможности использования динамической поляризации ядер в ядерных магнитометрах // Геофизическое приборостроение. 1962. Вып.12. с.35-43.
14. Сапунов В.А., Савельев Д.В., Денисова О.В., Киселев С.Е., Денисов А.Ю., Сабанин А.А. Современные протонные оверхаузеровские магнитометры: возможности и перспективы в области геологоразведки// Геологической службе России 300 лет. Международная геофизическая конференция: Тез. докл. СПб, 2000. с.290-292.
15. Сапунов В.А. Денисов А.Ю. Савельев Д.В. Филатов А.И. Современные оверхаузеровские магнетометры. // «Современные методы и средства океанологических исследований». 4 международная научно-техническая конференция. Тезисы докладов. М., 1998 г.С.67
16. Файрузов Р., Пономарев В.В., Муравьев Л.А. Чифунгу Т., Перейра А. Проверка стабильности пешеходных оверхаузеровских магнитометров POS // // Научные статьи на сервере "Все о геологии" [Электрон. ресурс]. 2007. Режим доступа: <http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1178423>
17. В.К. Хмелевской и др. Геофизические методы исследований. Учебное пособие для геологических специальностей вузов. Петропавловск-Камчатский: изд-во КГПУ. 2004. 232 с.
18. Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л., ЛГУ, 1978. 592 с
19. Denisov A., Denisova O., Sapunov V., Rasson J.L. Additional Measurement Algorithms in the Overhauser Magnetometer POS-1 // Xth IAGA Workshop on Geomagnetic Instruments, Data Acquisition and Processing: Abstracts. South Africa,

- Hermanus Magnetic Observatory, 2002. P.269-274.*
20. Denisova O., Sapunov V., Denisov A. *Effect of Variable Magnetic Fields on Measurements by Magnetometers Using Averaging Algorithms // XIth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing: Abstracts. Japan, Kakioka and Tsukuba, 2004. P. 92.*
 21. *G-858 magmapper, Operation Manual. San Jose, Geometrics, inc. 2001, 107 p*
 22. *Geophysical exploration instruments: Booklet // San Jose, USA, Geometrix, 1988. 148 p.*
 23. *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism. Gubbins D, Herrero-Bervera E. (Editors). Springer 2007, 1054 p*
 24. Hrvoich I. *Proton magnetometers for measurement of Earth's magnetic field // Workshop on Geomagnetic Observatory data acquisition and processing: Proc. Internat.- Finland, 1990. P.103-109.*
 25. Hrvoich I. Newitt L. *Instruments and Methodologies for Measurement of the Earth's Magnetic Field // Geomagnetic Observations and Models IAGA Special Sopron Book Series, 2011, Volume 5, PP. 105-126*
 26. Johnston, M. J. S. et al. *Precision of Geomagnetic Field Measurements in a Tectonically Active Region. // J. geomagn. geoelectr. 1984, V. 36, N. 3, P. 83-95.*
 27. Khomutov S.Y., Kusonsky O.A., Rasson J.L. et al. *The using of the absolute Overhauser magnetometers POS-1 in observatory practice: the results of the first 2.5 years // XI IAGA Workshop on Geomagnetic observatory instruments, data acquisition and processing: Book of abstracts. Kakioka, Japan, 2004.P.137*
 28. Overhauser A.W. *Dynamic nuclear polarization // Encyclopedia of Nuclear magnetic resonance edited by D.M. Grant, R.K. Harris. New York: Wiley, 1966. V.1. P.513-516.*
 29. Overhauser A.W. *Polarization of nuclei in metals // Phys. Rev. V.2. 1953. P.411-415.*
 30. Packard M., Varian R. *Free nuclear induction in the earth's magnetic field // Phys.Rev., 1954. V.93. P.941-945.*
 31. *Proton's gyromagnetic ratio. Table of world physical constants "2006 CODATA recommended values" [Electronic recourse]. 2007. Access mode: <http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?gammap>.*
 32. *Scintrex SM-5 NAVMAG specifications. Canada, Scintrex. 2006. 2 p. [Electronic recourse]. 2007. Access mode: http://www.scintrexltd.com/documents/Scintrex_SM5BrochureNewSwoosh.pdf*
 33. Sapunov V., Denisov A., Denisova O. *Metrology of proton and Overhauser magnetometers // Contributions to Geophysics & Geodesy. 2000. V.30, N.2. P.149.*
 34. Stanley, J.M., Cattach, M.K. *Developing geophysical techniques for detecting unexploded ordnance. First Break, vol.22, september 2004, p.55-61.*